

基于氧化镍背接触缓冲层碲化镉薄膜太阳能电池的研究

肖迪 王东明 李珣 李强 沈凯 王德钊 吴玲玲 王德亮

Nickel oxide as back surface field buffer layer in CdTe thin film solar cell

Xiao Di Wang Dong-Ming Li Xun Li Qiang Shen Kai Wang De-Zhao Wu Ling-Ling Wang De-Liang

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 66, 117301 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.117301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.117301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I11>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[ZnSe 量子点敏化纳米 TiO<sub>2</sub> 薄膜光电子特性研究](#)

[Photoelectron characteristics of ZnSe quantum dots-sensitized mesoporous La-doped nano-TiO<sub>2</sub> film](#)

物理学报.2017, 66(6): 067301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.067301>

[Cd<sub>x</sub>Zn<sub>1-x</sub>O 合金热力学性质的第一性原理研究](#)

[First-principles study on thermodynamic properties of Cd<sub>x</sub>Zn<sub>1-x</sub>O alloys](#)

物理学报.2016, 65(15): 157303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.157303>

[Sn 掺杂 ZnO 薄膜的室温气敏性能及其气敏机理](#)

[Room temperature gas sensing property and sensing mechanism of Sn-doped ZnO thin film](#)

物理学报.2016, 65(9): 097302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.097302>

[原子层沉积法生长 ZnO 的性质与前驱体源量的关系研究](#)

[Investigation on the relationship between the properties of atomic layer deposition ZnO film and the dose of precursor](#)

物理学报.2013, 62(14): 147306 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.147306>

[光伏型碲镉汞探测器在波段内连续激光辐照下的两种不同过饱和现象的产生机理](#)

[Generation mechanism of two different over-saturation phenomena of photovoltaic HgCdTe detectors irradiated by CW band-in laser](#)

物理学报.2013, 62(9): 097303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.097303>

# 基于氧化镍背接触缓冲层碲化镉薄膜 太阳能电池的研究\*

肖迪 王东明 李珣 李强 沈凯 王德钊 吴玲玲 王德亮†

(中国科学技术大学, 合肥微尺度物质科学国家实验室(筹), 合肥 230026)

(2016年12月2日收到; 2017年2月9日收到修改稿)

采用电子束蒸发法制备了NiO薄膜, 并对其作为碲化镉薄膜太阳能电池背接触缓冲层材料进行了相关研究. NiO缓冲层的加入使得碲化镉太阳能电池开路电压显著增大. 通过X射线光电子能谱测试得到的NiO/CdTe界面能带图表明NiO和CdTe的能带匹配度很好. NiO是宽禁带P型半导体材料, 在电池背接触处形成背场, 减少了电子在背表面处的复合, 从而提高电池开路电压. 通过优化NiO薄膜厚度, 制备得到转换效率为12.2%、开路电压为789 mV的碲化镉太阳能电池. 研究证实NiO是用来制备高转换效率、高稳定性碲化镉薄膜太阳能电池的一种极有前景的缓冲层材料.

**关键词:** 碲化镉, 薄膜太阳能电池, 氧化镍, 缓冲层

**PACS:** 73.61.Ga, 73.40.Lq, 72.80.Ga

**DOI:** 10.7498/aps.66.117301

## 1 引言

碲化镉(CdTe)是一种重要的II-VI族化合物半导体材料. 该材料禁带宽度为1.45 eV, 对太阳光谱的响应处于最理想的太阳光谱波段, 且在可见光范围内的吸收系数高达 $10^5 \text{ cm}^{-1}$ , 因此CdTe多晶薄膜太阳能电池因其转换效率高、所需材料成本低的优势而备受关注<sup>[1-3]</sup>. 近几年, 电池转换效率得到迅速提升<sup>[4]</sup>, 目前, 世界上CdTe太阳能电池的最高转换效率达22.1%. 然而, CdTe的功函数高达5.7 eV, 高于通常金属背电极的功函数, 难以形成良好的欧姆接触, 严重影响电池的性能<sup>[5]</sup>. 一般采用含铜背电极来形成欧姆接触以提高电池效率. 但是铜可以通过CdTe晶界向PN结扩散, 在CdTe/CdS界面处积累, 导致电池性能严重衰减<sup>[6]</sup>. 因此, 获得CdTe太阳能电池低阻稳定背接触是目前的研究重点之一<sup>[7-10]</sup>.

国外一些实验室采用过渡金属氧化物作为CdTe电池的后接触缓冲层, 形成低阻稳定背接触. 有文献报道 $\text{MoO}_3$ 作为背接触缓冲层可以大幅提高电池的开路电压( $V_{oc}$ )和转换效率, 采用 $\text{MoO}_3$ 背接触的CdTe太阳能电池转换效率达14.1%<sup>[11,12]</sup>. 本课题组研究发现采用 $\text{V}_2\text{O}_5$ 作为缓冲层可以降低电池的肖特基势垒, 提高电池器件的长期使用稳定性<sup>[13]</sup>. 目前关于过渡金属氧化物缓冲层的研究几乎全部采用N型半导体氧化物材料, P型过渡金属氧化物半导体NiO作为缓冲层的研究鲜有报道. Ishikawa等<sup>[14]</sup>将NiO引入CdTe太阳能电池, 但所得电池的转换效率较低, 为5.14%, 而且没有分析背表面处载流子的传输机理. NiO薄膜是一种出色的半导体材料, 已经应用于LED、电致变色、光伏器件等领域<sup>[15-17]</sup>. 本研究中, 我们采用电子束蒸发法制备NiO薄膜, 并使用P型金属氧化物NiO作为CdTe背接触缓冲层提高电池的转换效率和长期稳定性能.

\* 国家自然科学基金(批准号: 61474103, 51272247)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: eedewang@ustc.edu.cn

## 2 实验

制备的CdTe太阳能电池结构为玻璃/SnO<sub>2</sub>:F(FTO)/N-CdS/P-CdTe/背接触/金属电极. N-CdS 窗口层采用射频磁控溅射法在镀有SnO<sub>2</sub>:F 导电薄膜的玻璃衬底上沉积, 厚度约为80 nm. 吸收层P-CdTe薄膜利用实验室自主设计的近空间升华系统沉积, 厚度为4—5 μm. 样品在干燥空气中进行CdCl<sub>2</sub> 热处理来激活P-CdTe薄膜电学性能. 热处理后的样品用硝酸-磷酸混合溶液对CdTe进行表面刻蚀, 在CdTe表面形成富Te层. 缓冲层NiO薄膜的厚度为5, 10, 20, 40 nm, 采用电子束蒸发法制备, 蒸发原材料为NiO颗粒, 纯度为99.99%. 沉积过程中, 衬底温度为室温, 工作压强为 $5 \times 10^{-4}$  Pa, 生长速率由膜厚仪监测, 速率约为3 nm/min. 电池电极Au采用热蒸发法沉积. 以上为背接触结构为NiO/Au的电池制备过程. 为了进行对比研究, 我们还制备了Au, Cu/Au和Cu/NiO/Au背接触结构的CdTe薄膜电池.

## 3 结果与讨论

### 3.1 NiO薄膜的结构和性能表征

涉及的NiO薄膜均采用电子束蒸发法制备, 通过多种测试方法对玻璃衬底上生长厚度为200 nm的NiO薄膜进行表征. 图1(a)为样品的原子力显微镜(AFM)图像, 可以看出NiO薄膜表面均匀、平整. 由AFM测得的样品表面粗糙度为0.99 nm. 图1(b)为样品的X射线衍射(XRD)图谱. XRD图谱有两个特征峰, 位于37.2°和62.8°处, 分别对应立方晶相NiO的(111)晶面和(220)晶面. 根据NiO(111)晶面衍射峰的半峰全宽, 由谢乐公式可以计算出NiO的晶粒尺寸约为28 nm. 图1(c)所示为由紫外可见吸收光谱得到的 $(\alpha h\nu)^2$ 与光子能量 $(h\nu)$ 的关系曲线. 由公式 $\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^{1/2}$ , 其中 $\alpha$ 为吸收系数,  $h$ 为普朗克常数,  $\nu$ 为光子频率,  $A$ 为常数,  $E_g$ 为材料的禁带宽度, 可得曲线切线在横坐标上的截距为样品的禁带宽度. 由图2(c)可知, 制备的NiO薄膜的禁带宽度为3.61 eV, 与文献中提及的数值范围(3.4—3.8 eV)基本一致[18,19].

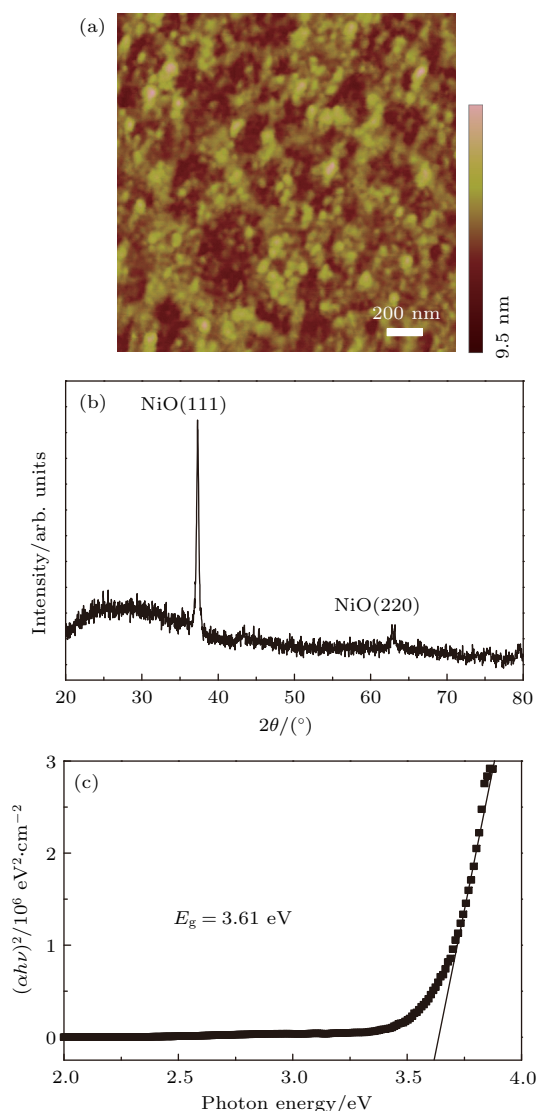


图1 (网刊彩色) (a) 玻璃衬底上沉积NiO薄膜的AFM图像; (b) XRD图谱; (c) 基于NiO薄膜的光吸收谱得出的 $(\alpha h\nu)^2$ 与光子能量的关系曲线

Fig. 1. (color online) (a) AFM surface morphology of NiO film deposited on glass; (b) XRD pattern of NiO film; (c)  $(\alpha h\nu)^2$  versus photon energy of NiO film on glass obtained according to the absorption spectrum.

### 3.2 X射线光电子能谱分析

用X射线光电子能谱(XPS)来分析电子束蒸发法制备NiO薄膜的组成成分. 图2所示为Ni-2p<sub>3/2</sub>和O-1s的XPS图谱, 并分别使用洛仑兹-高斯函数进行拟合. 图2(a)中Ni-2p<sub>3/2</sub>谱线包含3个特征峰, 其中位于853.9和855.4 eV的峰对应Ni<sup>2+</sup>和Ni<sup>3+</sup>的不同价态. 制备的NiO薄膜中存在Ni<sup>3+</sup>, 说明NiO薄膜是非化学计量比的, 即Ni与O的原子数比小于1, 存在Ni空位, 使得NiO呈现P型半导体特性, 满足作为CdTe背接触缓冲层的要求.

位于 856.7 eV 的峰对应空气中表面吸附导致的价态变化. 图 2 (b) 中, O-1s 谱线同样包含 3 个特征峰, 位于 529.7 和 531.2 eV 的峰分别对应 NiO, Ni<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 中的 O, 位于 532.3 eV 的峰对应表面吸附的氧原子. 实验测量得到这些 XPS 峰位值与文献中报道的结合能是一致的 [20,21].

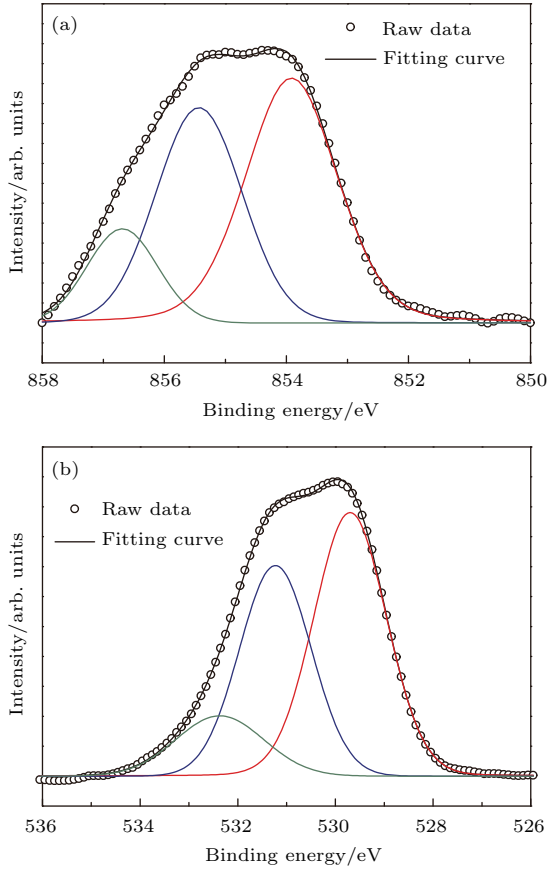


图 2 (网刊彩色) NiO 薄膜的 X 射线光电子能谱 (a) Ni-2p<sub>3/2</sub> 能谱; (b) O-1s 能谱  
Fig. 2. (color online) XPS spectra of (a) Ni-2p<sub>3/2</sub> and (b) O-1s of an as-deposited NiO film.

空穴在 CdTe 薄膜太阳能电池背接触处的传输对电池性能的影响很大, 通过背接触异质界面能带排列的定量表征, 可以很好地理解载流子在背表面的传输机理. XPS 测量技术是定量研究界面能带排列情况的有效测试手段 [13]. NiO/CdTe 界面处的价带偏移量  $E_{VBO}$  计算公式为

$$E_{VBO} = (C_{Ni} - E_{VBM}) - (C_{Cd} - E_{VBM}) - (C_{Ni} - C_{Cd}), \quad (1)$$

式中  $E_{VBM}$  为价带顶能级,  $C_{Ni} - E_{VBM}$  和  $C_{Cd} - E_{VBM}$  是与 NiO 和 CdTe 体材相关的参数, 分别用较厚的薄膜测量得到, 即分别在 200 nm 厚的

NiO 和 4  $\mu\text{m}$  厚的 CdTe 薄膜上测量, 如图 3 (b) 和图 3 (a) 所示;  $C_{Ni} - C_{Cd}$  是在 NiO/CdTe 界面处 Ni-2p<sub>3/2</sub> 和 Cd-3d<sub>5/2</sub> 的相关芯能级差, 在 4  $\mu\text{m}$  厚的

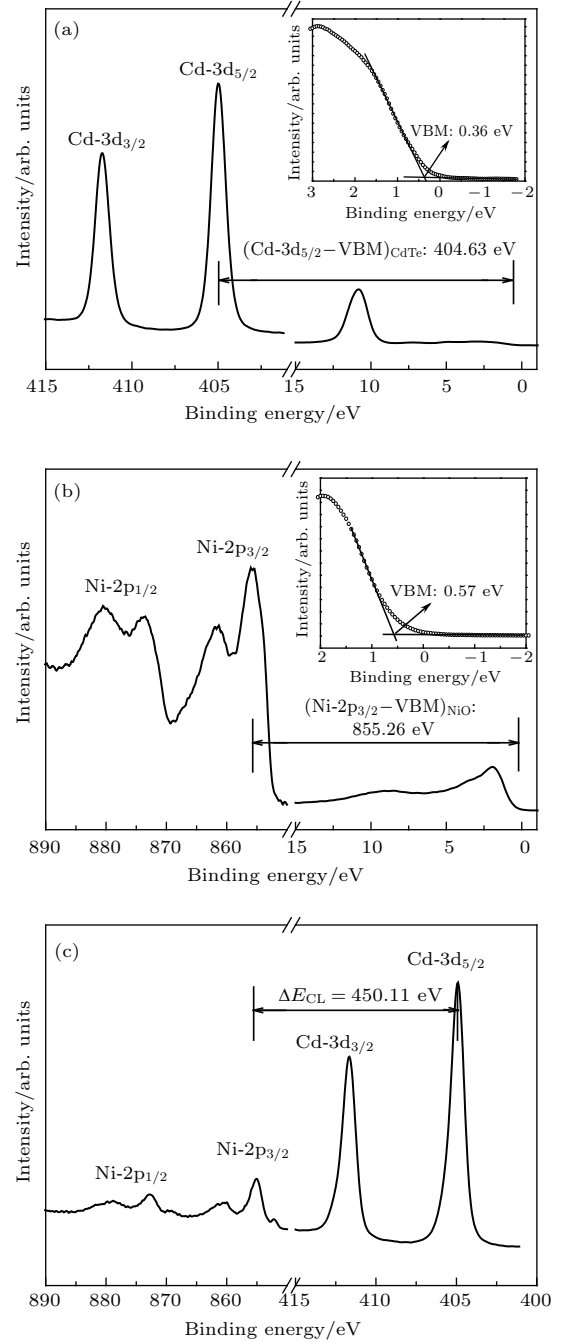


图 3 (a) 4  $\mu\text{m}$  厚 CdTe 的 Cd-3d 芯电子能谱和价带谱; (b) 200 nm 厚 NiO 的 Ni-2p 芯电子能谱和价带谱; (c) 3 nm 厚 NiO 覆盖 CdTe 表面时在 NiO/CdTe 界面处的 Ni-2p 和 Cd-3d 的芯电子能谱  
Fig. 3. (a) Core-level Cd-3d and valence band XPS spectra of 4  $\mu\text{m}$  thick bulk CdTe; (b) core-level Ni-2p and valence band XPS spectra of 200 nm thick bulk NiO; (c) two core levels of Ni-2p<sub>3/2</sub> and Cd-3d<sub>5/2</sub>, which are measured at a NiO/CdTe interface with a NiO coating thickness of 3 nm.



CdTe 薄膜上生长 3 nm 厚的 NiO 样品测得, 如图 3(c) 所示. 3 nm 厚的 NiO 可以保证 NiO/CdTe 界面处的光电子能后逃逸出来, 进行图谱测量. 由 (1) 式可以计算得到 NiO/CdTe 界面处的价带偏移量  $E_{VBO}$  为 0.52 eV, NiO 的价带高于 CdTe 的价带, 空穴在背表面传输时不存在能垒, 有利于空穴向背电极传输. 界面处的导带偏移量  $E_{CBO}$  计算公式为

$$E_{CBO} = E_{VBO} + E_{g-NiO} - E_{g-CdTe}, \quad (2)$$

式中  $E_{VBO}$  是界面处的价带偏移量,  $E_{g-NiO}$  和  $E_{g-CdTe}$  是 NiO 和 CdTe 的禁带宽度, 分别为 3.61 和 1.45 eV [1]. 可以计算得到 NiO/CdTe 界面处的导带偏移量  $E_{CBO}$  为 2.68 eV, NiO 的导带高于 CdTe, 因而 NiO 缓冲层可以起到背场反射作用, 将背表面 CdTe 中的电子反射到 PN 结处, 降低电子在背表面处的复合. 根据以上 XPS 数据, 可以得到 NiO/CdTe 界面处的能带匹配图, 如图 4 所示. 根据文献报道, CdTe 价带顶一般位于费米能级以下约 0.6—0.7 eV [22]. 我们利用电压-电容测量了制备的 CdTe 的空穴浓度, 其数值约为  $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ . 根据载流子浓度可以计算费米能级, 与上述数值一致. 可以看出, 该能带排列说明 NiO 是一种很好的 CdTe 电池背接触缓冲层材料.

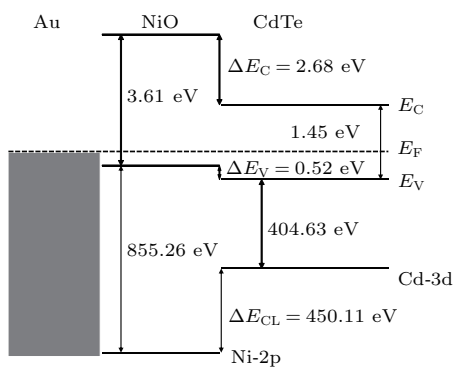


图 4 基于 XPS 测得数据得到的背电极接触 CdTe/NiO/Au 界面的能级匹配排列图

Fig. 4. Band alignment at the CdTe/NiO/Au contact interface obtained based on the XPS data.

### 3.3 NiO 缓冲层厚度对电池性能的影响

为得到高转换效率的 CdTe 薄膜太阳电池, 我们首先优化了 NiO 缓冲层的厚度, 制备了不同厚度的 NiO/Au 背接触结构 CdTe 电池, NiO 缓冲层厚度分别为 0, 5, 10, 20, 40 nm. 图 5 为具有不同厚度 NiO 缓冲层的 CdTe 电池亮态电流-电压 ( $J-V$ ) 曲

线. 可以看出, NiO 缓冲层的最佳厚度为 20 nm, 此时电池的开路电压为 789 mV, 转换效率为 12.2%, 非常接近实验室制备的以 Cu/Au 作为常规背接触结构电池的转换效率.

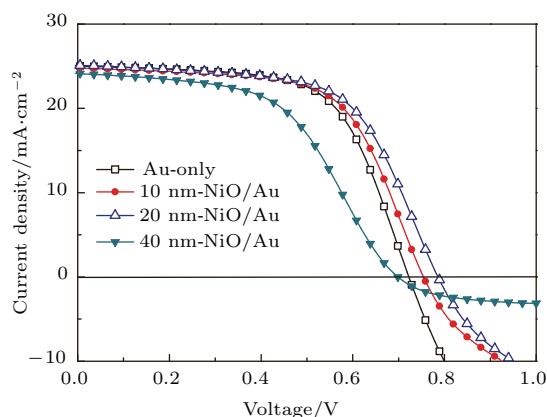


图 5 具有不同厚度 NiO 背接触层 CdTe 太阳电池的亮态伏安特性曲线

Fig. 5. Light current density-voltage curves of CdTe solar cells with NiO buffer layers of different thicknesses.

图 6 所示为电池不同参数随 NiO 厚度的变化. 从图 6(a) 可以看出, NiO 为 0 nm 时, 开路电压  $V_{oc}$  为 724 mV; 当加入 5 nm 厚 NiO 时,  $V_{oc}$  提高到 763 mV; 继续增加 NiO 厚度,  $V_{oc}$  继续增大; 当 NiO 厚度为 20 nm 时,  $V_{oc}$  达到最大值, 为 789 mV, 比 0 nm 时提高 65 mV; 当 NiO 厚度为 40 nm 时,  $V_{oc}$  急剧下降至 711 mV. 从图 6(b) 可以看出短路电流  $J_{sc}$  在 24.0—25.0  $\text{mA}/\text{cm}^2$  之间, NiO 对  $J_{sc}$  基本没有影响. 从图 6(c) 可以看出, 加入 5 nm 厚 NiO 后, 填充因子 (FF) 从 63% 下降到 59%; 加入 40 nm 厚 NiO 后, FF 下降到 52%. 从图 6(d) 可以看出, 加入 20 nm 厚 NiO 后, 电池转换效率由 10.6% 提高到 12.2%.

从电池的性能测量结果可以看出, NiO 的加入提升了 CdTe 电池性能, 原因如下. NiO 功函数较高, 电池背表面没有空穴能垒, 使得空穴在背表面处可以快速传输至金属电极; 其次, NiO 是宽禁带 P 型半导体材料, 禁带宽度达 3.61 eV, 以至于 NiO 的导带比 CdTe 的导带高 2.68 eV (图 4), 所以 NiO 可以作为背场 (BSF) 材料, 在吸收层 CdTe 背表面处的电子在背场的作用下反射到 PN 结处, 大大减少了电子在背表面处的复合, 提高了电池的开路电压和转换效率. 但是, NiO 本身是氧化物, 导电性不好, 我们对玻璃衬底上制备的 NiO 薄膜进行 Hall

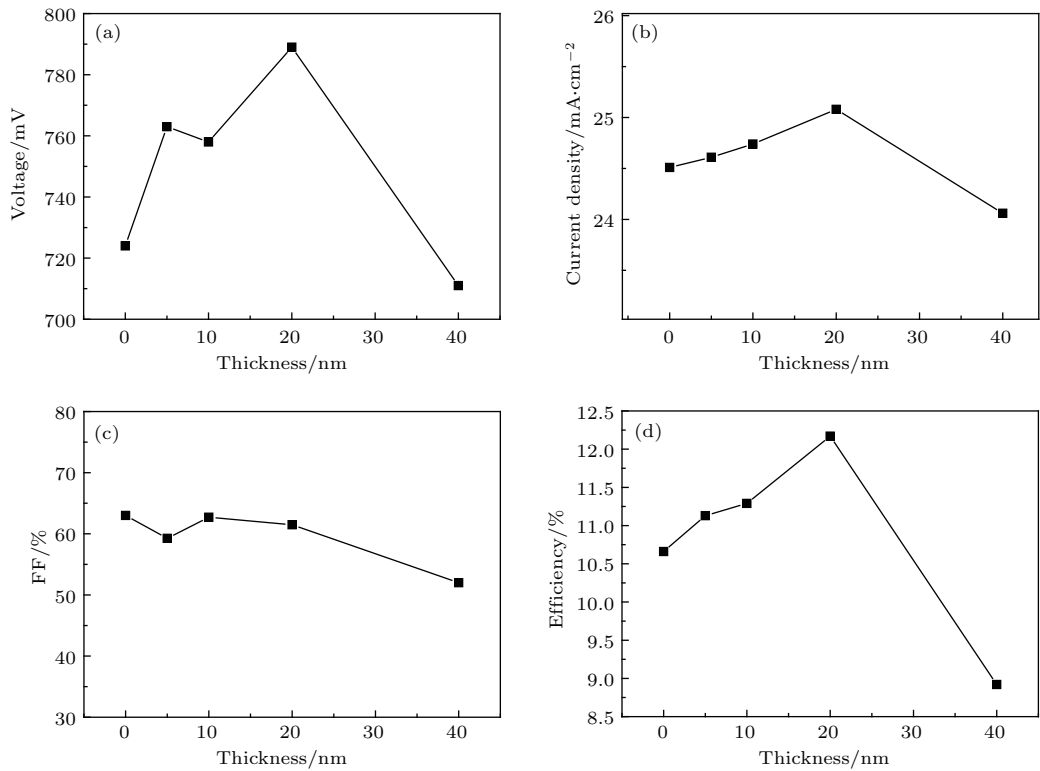


图6 CdTe 太阳能电池器件参数随 NiO 缓冲层厚度的变化情况 (a) 开路电压; (b) 短路电流; (c) 填充因子; (d) 转换效率

Fig. 6. Parameters of CdTe solar cells with different NiO buffer layer thicknesses: (a) Open-circuit voltage; (b) short-circuit current; (c) fill factor; (d) cell efficiency.

测试, 结果显示 NiO 为 P 型半导体, 载流子浓度为  $2.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , 证实制备得到的 NiO 薄膜导电性较差. 因此, 过厚的 NiO 薄膜使得电池的串联电阻增大, 不利于电池性能的提高, 该结果与  $J$ - $V$  曲线相符合.

### 3.4 Cu/NiO/Au 背接触结构的 CdTe 电池性能

由于 NiO 导电性不好, 过厚的 NiO 缓冲层会影响电池的性能, 为此我们制备 Cu/NiO 叠层薄膜作为电池背接触缓冲层, 来提高 NiO 层的导电性<sup>[23]</sup>. 制备了 3-nm-Cu/20-nm-NiO/Au 和 5-nm-Cu/Au 背接触结构的 CdTe 电池. 图 7 所示为两种背接触结构电池的亮态  $J$ - $V$  曲线. 加入 3 nm 厚 Cu 薄膜后, NiO 背接触电池性能显著提高, 得到的电池开路电压  $V_{oc}$  为 796 mV, 短路电流  $J_{sc}$  为  $24.2 \text{ mA/cm}^2$ , 填充因子为 70.2%, 转换效率 ( $\eta$ ) 为 13.5%. 由图 7 可看出 NiO 背接触电池引入少量 Cu 后, 电池性能优于 Cu/Au 背电极结构电池的性能. 由于引入 Cu 量较少, 电池稳定性也得到大大提高.

为验证 Cu/NiO/Au 背接触结构电池的稳定

性, 对 3-nm-Cu/20-nm-NiO/Au 和 5-nm-Cu/Au 两种背接触结构的电池进行热稳定性测试. 图 8 所示为在  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  干燥空气中经过 40 h 和 80 h 后的电池亮态  $J$ - $V$  曲线. 可以看出, 3-nm-Cu/20-nm-NiO/Au 电池经过 80 h 后电池性能基本不变, 转换效率由 13.1% 降到 12.9%, 电池性能十分稳定; 而 5-nm-Cu/Au 电池经过 80 h 后电池性能衰减较为明显, 转换效率从 12.0% 下降到 11.0%.

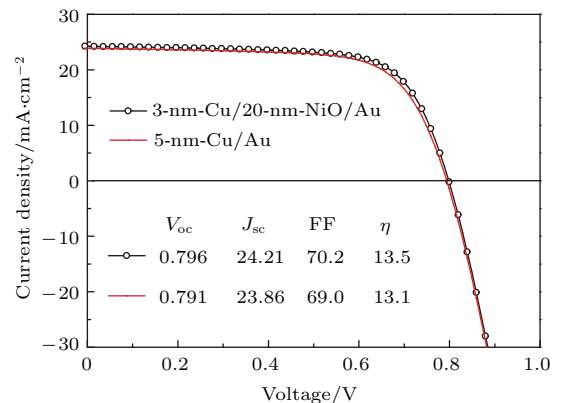


图7 (网刊彩色) 不同背接触结构 CdTe 太阳能电池的亮态伏安特性曲线

Fig. 7. (color online) Light  $J$ - $V$  curves of two CdTe solar cells with different back contact structures.

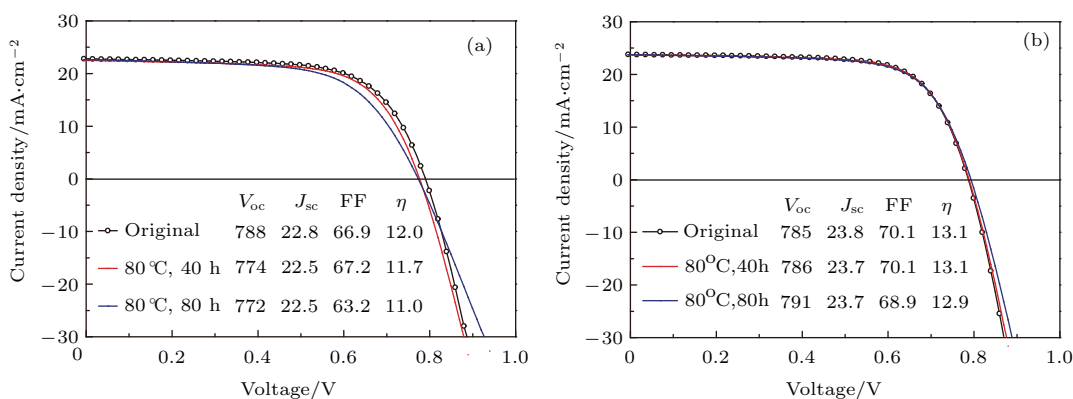


图8 (网刊彩色) 不同背接触结构CdTe太阳能电池在80 °C空气条件下, 经历不同时间加速老化后的J-V曲线衰减对比 (a) 5-nm-Cu/Au; (b) 3-nm-Cu/20-nm-NiO/Au

Fig. 8. (color online) Light J-V curves of two CdTe solar cells with different back contact structures aged at 80 °C in the air atmosphere for different time: (a) 5-nm-Cu/Au; (b) 3-nm-Cu/20-nm-NiO/Au.

Cu在CdTe太阳能电池中作用显著, 由于CdTe材料功函数较高, 与背电极难以形成欧姆接触, 严重影响器件性能, Cu可以与CdTe表面形成重掺杂层, 提高背表面的接触性能, 因此, 一般将Cu/Au背接触CdTe太阳能电池作为标准背接触电池. 但是, Cu可以通过CdTe晶界向CdS/CdTe扩散, 影响PN结性质, 因此Cu/Au背接触的CdTe太阳能电池长期稳定性较差. 本文采用的Cu/NiO/Au结构中, Cu可以在CdTe表面形成重掺杂层, 提高CdTe表面的接触性能, NiO可以起到电子反射的作用, 在引入少量Cu的情况下即可达到转换效率与标准Cu/Au背接触相当, 甚至更加优异的电池器件效果, Cu量的减少提高了电池的长期稳定性能. 因此, 背接触结构Cu/NiO/Au可以在保证器件转换效率较高的情况下, 提高器件的长期稳定性能, 有利于电池的大规模商业应用.

## 4 结 论

本文将P型NiO薄膜作为CdTe太阳能电池的背接触缓冲层材料, 制备了不同厚度NiO背接触缓冲层的CdTe太阳能电池, 确定了NiO缓冲层的最佳厚度为20 nm. 通过XPS测试得到NiO/CdTe界面能带匹配很好, 界面处NiO/CdTe的价带偏移量为0.52 eV, NiO的价带高于CdTe的价带, 使空穴得以快速传输; 导带偏移量为2.68 eV, NiO的导带高于CdTe的导带, 使得NiO起到背场反射电子的作用, 减少了电子在电池背表面处的复合, 大幅提高电池的开路电压和转换效率. 我们制备了

3-nm-Cu/20-nm-NiO/Au背接触结构的电池, 开路电压为796 mV, 转换效率为13.5%. Cu/NiO/Au背接触结构电池在转换效率和热稳定性上优于标准Cu/Au背接触结构的电池. 因此, NiO是用来制备高效、稳定CdTe薄膜太阳能电池的一种极有前景的缓冲层材料.

## 参考文献

- [1] Britt J, Ferekides C 1993 *Appl. Phys. Lett.* **62** 2851
- [2] Wu X Z 2004 *Sol. Energy* **77** 803
- [3] Bai Z Z, Yang J, Wang D L 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 143502
- [4] Green M A, Emery K, Hishikawa Y, Warta W, Dunlop E D 2015 *Prog. Photovolt Res. Appl.* **23** 1
- [5] Demtsu S H, Sites J R 2006 *Thin Solid Films* **510** 320
- [6] Corwine C R, Pudov A O, Gloeckler M, Demtsu S H, Sites J R 2004 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **82** 481
- [7] Paudel N R, Yan Y F 2016 *Prog. Photovolt Res. Appl.* **24** 94
- [8] Türck J, Nonnenmacher H J, Connor P M L, Siol S, Siepchen B, Heimfarth J P, Klein A, Jaegermann W 2016 *Prog. Photovolt Res. Appl.* **24** 1229
- [9] Yang R L, Wang D Z, Jeng M J, Ho K M, Wang D L 2016 *Prog. Photovolt Res. Appl.* **24** 59
- [10] Phillips A B, Khanal R R, Song Z N, Zartman R M, DeWitt J L, Stone J M, Roland P J, Plotnikov V V, Carter C W, Stayancho J M, Ellingson R J, Compaan A D 2013 *Nano Lett.* **13** 5224
- [11] Paudel N R, Xiao C X, Yan Y F 2015 *Prog. Photovolt Res. Appl.* **23** 437
- [12] Paudel N R, Compaan A D, Yan Y F 2013 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **113** 26
- [13] Shen K, Yang R L, Wang D Z, Jeng M J, Chaudhary S, Ho K M, Wang D L 2016 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **144** 500

- [14] Ishikawa R, Furuya Y, Araki R, Nomoto T, Ogawa Y, Hosono A, Okamoto T, Tsuboi N 2016 *Jpn. J. Appl. Phys.* **55** 02BF04
- [15] Liu S Y, Liu R, Chen Y, Ho S, Kim J H, So F 2014 *Chem. Mater.* **26** 4528
- [16] Sonavane A C, Inamdar A I, Shinde P S, Deshmukh H P, Patil R S, Patil P S 2010 *J. Alloys Compd.* **489** 667
- [17] Jung J W, Chueh C C, Jen A K Y 2015 *Adv. Mater.* **27** 7874
- [18] Nahass M M E, Ismail M E, Hagary M E 2015 *J. Alloys Compd.* **646** 937
- [19] Ai L, Fang G J, Yuan L Y, Liu N S, Wang M J, Li C, Zhang Q L, Li J, Zhao X Z 2008 *Appl. Surf. Sci.* **254** 2401
- [20] Yin X T, Chen P, Que M D, Xing Y L, Que W X, Niu C M, Shao J Y 2016 *ACS Nano* **10** 3630
- [21] Wang Z Y, Lee S H, Kim D H, Kim J H, Park J G 2010 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **94** 1591
- [22] Li J J, Diercks D R, Ohno T R, Warren C W, Lonergan M C, Beach J D, Wolden C A 2015 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **133** 208
- [23] Kim J H, Liang P W, Williams S T, Cho N, Chueh C C, Glaz M S, Ginger D S, Jen A K Y 2015 *Adv. Mater.* **27** 695



# Nickel oxide as back surface field buffer layer in CdTe thin film solar cell\*

Xiao Di Wang Dong-Ming Li Xun Li Qiang Shen Kai Wang De-Zhao  
Wu Ling-Ling Wang De-Liang<sup>†</sup>

(Hefei National Laboratory for Physical Sciences at the Microscale, University of Science and Technology of China,  
Hefei 230026, China)

( Received 2 December 2016; revised manuscript received 9 February 2017 )

## Abstract

In this work, we report that NiO thin film can be used as a back contact buffer layer in CdTe thin film solar cells. The NiO layer is prepared by electron beam evaporation. To optimize the thickness of the NiO thin film, we fabricate some CdTe solar cells with different NiO thickness values. A NiO/Au back contact CdTe solar cell with an efficiency of 12.17% and an open-circuit voltage  $V_{oc}$  of 789 mV is obtained, which are comparable to those of a standard Cu/Au back contact solar cell. The X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) is used to quantitatively characterize the band alignment at the CdTe/NiO interface. It can be seen from the band alignment that the valence band offset ( $E_{VBO}$ ) is 0.52 eV and the conduction band offset ( $E_{CBO}$ ) is 2.68 eV. The  $E_{VBO}$  presents no energy barrier for hole to transport from CdTe to NiO. The value of  $E_{CBO}$  indicates that NiO can act as a back surface field layer (BSF) to dramatically reduce carrier recombination in the contact region of a CdTe cell, leading to an improved  $V_{oc}$ . The band alignment obtained from XPS measurement shows that the band alignments of NiO and CdTe are perfectly matched. However, the conductivity of NiO film is poor. The insertion of a NiO buffer layer in the back contact increases the series resistance and reduces the fill factor (FF). We propose to use Cu/NiO composite structure as a bi-layer contact to improve the conductivity of the NiO buffer layer, which at the same time can be used to dope the CdTe film surface by Cu to obtain a low resistive contact. We fabricate a cell with a contact structure of 3-nm-Cu/20-nm-NiO/Au and the cell has a  $V_{oc}$  of 796 mV, a  $J_{sc}$  (short-circuit current) of 24.2 mA/cm<sup>2</sup>, an FF of 70.2% and an efficiency of 13.5%. In order to study the stability of the solar cell with a Cu/NiO/Au back contact, a thermal stressing test is carried out at a temperature of 80 °C in the air atmosphere. For the Cu/NiO/Au back contact structure solar cell, the efficiency decreases from 13.1% to 12.9% after the cell is stressed for 80 h, showing that the stability of the Cu/NiO/Au back contact cell is significantly improved compared with that of the standard Cu/Au contact cell. In summary, the experimental results obtained in this study demonstrate that NiO thin film is a promising buffer layer for manufacturing stable and high efficiency CdTe thin film solar cells.

**Keywords:** CdTe, thin film solar cell, NiO, buffer layer

**PACS:** 73.61.Ga, 73.40.Lq, 72.80.Ga

**DOI:** 10.7498/aps.66.117301

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61474103, 51272247).

† Corresponding author. E-mail: [eedewang@ustc.edu.cn](mailto:eedewang@ustc.edu.cn)